

B-02

USO DEL PVC-O EN LAS REDES HIDRÁULICAS DE MODERNIZACIONES Y TRANSFORMACIONES EN REGADÍO COMO MEDIDA DE OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO Y AHORRO ENERGÉTICO

Rincón Benito, Marcos (1) (P)

¹Técnico Pre-Postventa, Molecor, marcos.rincon@molecor.com

Resumen

España ha vivido durante los últimos 20 años un periodo de una intensa actividad en todo lo que se refiere a la modernización y transformación de sus regadíos. El marco energético inicial en el que se ejecutaron todas estas actuaciones ha cambiado enormemente. El coste de la energía y del término de potencia está constituyendo el caballo de batalla de las Comunidades de Regantes.

En todas esas actuaciones ya acometidas, hay una serie de medidas paliativas que las Comunidades de Regantes están adoptando para ajustar todo lo posible su factura eléctrica, pero para las nuevas actuaciones pendientes que aún son muchas, se está a tiempo de incidir en el diseño hidráulico a través del uso de materiales más eficientes desde el punto de vista energético para el transporte del agua de riego como es el caso del PVC Orientado (PVC-O).

1. Introducción

En los últimos 20 años, periodo en el que se ha acometido la modernización del regadío de 1,7 millones de has, el marco energético ha cambiado notablemente respecto al existente.

Nadie podía sospechar que desde la desaparición de las tarifas especiales de Riego R1, R2 y R3 en el año 2008 el incremento del coste del término de potencia haya sido de más del 1.200 %. Esta circunstancia desde luego está lastrando a muchas Comunidades que decidieron modernizar atraídas por sus grandes beneficios, debiendo afrontar el pago de una potencia contratada durante los 12 meses del año, cuando tan sólo es utilizada en 6 de ellos.

En estas modernizaciones y transformaciones en regadío ya acometidas y en periodo de explotación las Comunidades de Regantes se han volcado en la búsqueda de soluciones para paliar los enormes costes que les genera su factura eléctrica.

- Realizando controles y mantenimientos de los equipos electromecánicos.
- Calculando eficiencias de la red de distribución y actuando en aquellas en las que la eficiencia no fuera la adecuada.
- Optimizando la gestión de las Estaciones de Bombeo elevadoras.
 - ✓ Regulando la E.B en función de la curva resistente.
 - ✓ Prohibiendo el riego en horas "caras".
 - ✓ Exprimiendo al máximo las posibilidades de los equipos instalados (variadores, bombas,...).

- ✓ Reduciendo el consumo de energía reactiva, instalando baterías de condensadores en aquellas estaciones que no las tuvieran.
- Optimizando el uso de las redes de riego.
 - ✓ Utilizando sistemas de telecontrol.
 - ✓ Agrupando y concentrando riegos. y programando de tal manera que se puedan controlar mejor los costes eléctricos.
 - ✓ Controlando todas las pérdidas de caudal que puedan existir en la red, calculando eficiencias de la red de distribución.
- Definiendo de una manera exacta sus necesidades de bombeo, optimizando así su contratación de potencia.
-Etc.

Es en las modernizaciones aún pendientes de acometer donde se puede actuar en mayor medida, adoptando medidas tales como:

- Ejecución de balsas de acumulación para aprovechar el caudal que se pueda bombear en horas con menor coste energético.
- Aprovechar todos los desniveles naturales para reducir los costes de bombeo.
- Uso de materiales eficientes que permitan, debido a sus características intrínsecas, el transporte del agua de riego con la menor pérdida de carga posible.
-Etc.

Es pues el marco actual, el más apropiado para el uso del **PVC-O** y sus accesorios en las redes hidráulicas de las nuevas modernizaciones. Un material, que debido a sus propiedades genera una menor pérdida de carga y consecuentemente de energía respecto otros materiales y permite un ahorro considerable de la potencia necesaria a instalar y posteriormente contratar y del propio consumo de energía en estas actuaciones.

Con esta exposición se pretende mostrar las notables diferencias existentes entre el **PVC-O** y otros materiales, mostrando ejemplos teóricos y reales de consumo de energía en impulsiones de agua en modernizaciones y transformaciones en riego.

2. Propiedades del PVC-O que reducen el consumo energético

La reducción del espesor de pared que se produce en el proceso de orientación molecular proporciona a la tubería mayor diámetro interno y sección de paso. Además, la superficie interna es extremadamente lisa, lo que reduce al mínimo las pérdidas de carga y dificulta la formación de depósitos en las paredes del tubo.

En la Tabla 1 se indican diferentes valores del coeficiente de rugosidad recomendado para tuberías nuevas y en servicio en función del tipo de material y de la fórmula de cálculo considerada para la pérdida de carga.

Material	Prandtl-Colebrook		Hazen-Williams		Manning	
	K/ mm		C		N	
	nuevo	servicio	nuevo	servicio	nuevo	servicio
Fundición dúctil	0,030	0,200	130	100	0,012	0,017
Hormigón	0,300	3,000	140	110	0,013	0,017
Acero	0,030	0,100	120	90	0,008	0,011
PEAD	0,005	0,030	150	140	0,007	0,009
PRFV	0,030	0,060	110	100	0,009	0,010
PVC-O	0,030	0,060	150	140	0,009	0,009

Tabla 1. NACYII-2012 Normas para Abastecimiento del Canal de Isabel II.

Esta circunstancia, permite para un mismo diámetro nominal reducir la velocidad y por lo tanto la pérdida de carga, o incrementar el caudal transportado.

De esta forma se logra entre un 15% y un 40% de mayor capacidad hidráulica que tuberías de otros materiales con diámetros externos similares (Figura 1).

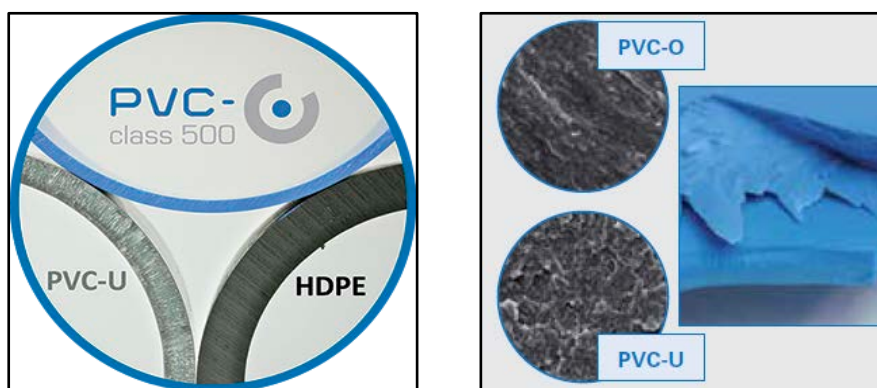


Figura 1. Detalle de espesores diferentes materiales y rugosidad y estructura laminar del PVC-O.

Está claro, que las tuberías, además de ser capaces de soportar la presión, han de transportar la mayor cantidad de agua con el menor gasto energético. El menor espesor frente a las tuberías de plástico convencionales y la menor rugosidad interna comparada con tuberías metálicas, hacen de la tubería de PVC-O la de mayor capacidad hidráulica (Tabla 2).

	PVC-O	PVC-U	PEAD	PRFV
<i>Diámetro Nominal (mm)</i>	500	500	500	500
<i>Diámetro interior (mm)</i>	473	441	409	500
<i>Rugosidad (C Hazen Williams)</i>	140	140	140	100

Tabla 2. Características de la tubería DN500 PN16.

La utilización de tuberías con menor capacidad hidráulica conllevará usar un mayor diámetro nominal, lo que perjudicará la rentabilidad y el coste de la inversión de la infraestructura. La solución con tubería PVC-O siempre dará la mejor eficiencia entre el coste de la inversión y la capacidad hidráulica disponible (Figura 2).

$$V = 0,355 \cdot C \cdot D_i^{0,63} \cdot J^{0,54}$$

V = Velocidad media en m/s

D_i = Diámetro interior en m

J = Pérdida de carga en m/m

C = Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams (para el PVC-O; C = 150)

Figura 2. Cálculo de las pérdidas de carga. Fórmula de Hazen Williams.

3. Comparativo del PVC-O con otros materiales

Si hacemos un comparativo de las **capacidades hidráulicas** entre las tuberías plásticas más comúnmente usadas en las obras de modernización y transformación en regadío con igual diámetro nominal (DN), caso del PEAD y del PVC-U, el **PVC-O** tiene una

capacidad hidráulica de un 25% más que el PEAD y un 14% más que el PVC-U tal y como se puede apreciar en tabla adjunta (Tabla 3).

Para este comparativo se ha usado la fórmula de Hazen Williams con los coeficientes de rugosidad definidos en el Manual de las Normas para abastecimiento del Canal de Isabel II.

	Tubería			Diámetro Interior (m)	Caudal Q (l/s)	Capacidad hidráulica
	Material	PN	DN			
1	PVC-O	16	500	0,473	350	100%
2	PEAD	16	500	0,409	262	75%
3	PVC-U	16	500	0,441	303	86%

Tabla 3. Capacidad hidráulica, limitando la velocidad a 2 m/s.

Si este comparativo lo hacemos extensible a la **pérdida de carga** limitando en todos los casos la velocidad a 2 m/s (Tabla 4), veremos que incluso transportando mayor caudal la pérdida de carga o energía es menor.

	Tubería			Caudal Q (l/s)	C (Hazen Williams)	J (Pérdida de Carga unitaria) m/km
	Material	PN	DN			
1	PVC-O	16	500	350	140	6,21
2	PEAD	16	500	262	140	7,34
3	PVC-U	16	500	303	140	6,70

Tabla 4. Capacidad hidráulica y pérdida de carga, limitando la velocidad a 2 m/s.

Si el comparativo es con otros materiales plásticos cuyo DN está definido por su diámetro interior como es el caso del PRFV, la capacidad hidráulica del PRFV (Tabla 5) será mayor al disponer de un diámetro interno mayor, pero la pérdida de carga, como podemos comprobar en tabla adjunta (Tabla 6) es un 42% mayor en el PRFV, por lo que, en la impulsión o bombeo del agua precisará de mayor energía, siempre y cuando se pretenda cumplir con determinados requisitos de presión en los puntos de suministro de caudal.

	Tubería			Diámetro Interior (m)	Caudal Q (l/s)	Capacidad hidráulica
	Material	PN	DN			
1	PVC-O	16	500	0,473	350	100%
4	PRFV	16	500	0,5	390	111%

Tabla 5. Capacidad hidráulica, limitando la velocidad a 2 m/s.

	Tubería			Caudal Q (l/s)	C (Hazen Williams)	J (Pérdida de Carga unitaria) m/km
	Material	PN	DN			
1	PVC-O	16	500	350	140	6,21
4	PRFV	16	500	390	100	10,77

Tabla 6. Capacidad hidráulica y pérdida de carga, limitando la velocidad a 2 m/s.

La misma situación que se da con el PRFV se da si comparamos el **PVC-O** con otras tuberías no plásticas, cuyo diámetro nominal viene definido por norma por su diámetro interior, tales como la fundición dúctil, el acero o el hormigón con camisa de chapa.

	Tubería			Diámetro Interior (m)	Caudal Q (l/s)	Capacidad hidráulica
	Material	PN	DN			
1	PVC-O	16	500	0,473	350	100%
5	Acero	16	500	0,500	390	111%
6	Fundición	C30	500	0,500	390	111%

Tabla 7. Capacidad hidráulica, limitando la velocidad a 2 m/s.

	Tubería			Caudal Q (l/s)	C (Hazen Williams)	J (Pérdida de Carga unitaria) m/km
	Material	PN	DN			
1	PVC-O	16	500	350	140	6,21
5	Acero	16	500	390	90	13,09
6	Fundición	C30	500	390	100	10,77

Tabla 8. Capacidad hidráulica y pérdida de carga, limitando la velocidad a 2 m/s.

La pérdida de carga unitaria correspondiente a la fundición dúctil supone un 42% más de la del PVC-O mientras que en el caso del acero, el diferencial es del 52%.

Como resumen y ejemplo para un DN500 mm, en términos de capacidad hidráulica y pérdida de carga se adjunta la siguiente tabla (Tabla 9):

	Tubería			Capacidad hidráulica	Pérdida de Carga unitaria
	Material	PN	DN		
1	PVC-O	16	500	100%	100%
2	PEAD	16	560	75%	118%
3	PVC-U	16	500	86%	108%
4	PRFV	16	500	111%	174%
5	Acero	16	500	111%	211%
6	Fundición	C30	500	111%	173%

Tabla 9. Comparativa resumen

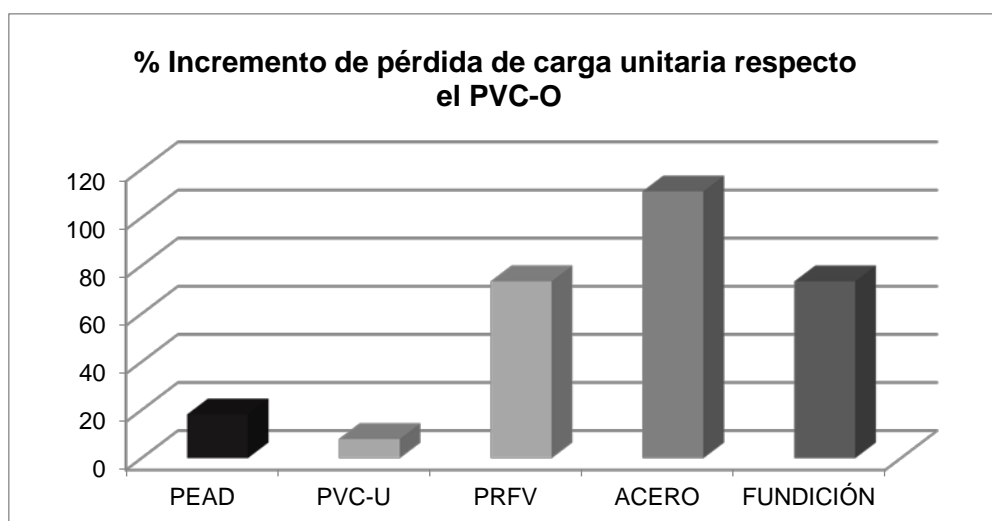


Figura 3. Comparativo de la pérdida de carga unitaria (velocidad limitada a 2 m/s)

4. Ejemplos teóricos y reales (referencias de obras)

Supongamos que hemos de diseñar una estación de bombeo que impulse 300 l/s para el llenado de una balsa o depósito que está a una diferencia de cotas de 70 m, y hemos de definir, diámetro, timbraje y potencia necesaria en la estación de bombeo para impulsar ese caudal.

Limitamos, como anteriormente a 2 m/s la velocidad máxima del agua en la impulsión (Tabla 10), eligiendo un diámetro superior en aquellos materiales que superen ese valor para el tanteo de un diámetro nominal inicial de 500 mm:

	Tubería			π	Caudal Q (l/s)	Diámetro Interior (m)	Velocidad
	Material	PN	DN				
1	PVC-O	16	500	3,1416	300	0,4728	1,71
2	PEAD	16	560	3,1416	300	0,4584	1,82
3	PVC-U	16	500	3,1416	300	0,4406	1,97
4	PRFV	16	500	3,1416	300	0,5	1,53
5	Acero	16	500	3,1416	300	0,5	1,53
6	Fundición	C30	500	3,1416	300	0,5	1,53

Tabla 10. Velocidad máxima del agua en la impulsión

La Altura de bombeo será la debida a la suma de la diferencia de alturas y la pérdida de carga (Tabla 11).

	Tubería			Caudal	C (Hazen Williams)	J (m/km)	LONG (km)	Total J	10% Pérdidas localizadas	Total J
	Material	PN	DN							
1	PVC-O	16	500	300	140	4,67	5	23,33	2,33	25,67
2	PEAD	16	560	300	140	5,43	5	27,13	2,71	29,84
3	PVC-U	16	500	300	140	6,58	5	32,90	3,29	36,19
4	PRFV	16	500	300	100	6,63	5	33,14	3,31	36,45
5	Acero	16	500	300	90	8,05	5	40,27	4,03	44,30
6	Fundición	C30	500	300	100	6,63	5	33,14	3,31	36,45

Tabla 11. Pérdida de carga en impulsión

La potencia (Figura 4 y Tabla 12) necesaria a instalar en la estación de bombeo para cada material sería:

$$P_{teorica} = H_B \times \rho \times g \times Q_T$$

H_B Altura dinámica (carga de trabajo de la bomba)

ρ Densidad del agua

g Coeficiente de gravedad

Q_T Caudal total

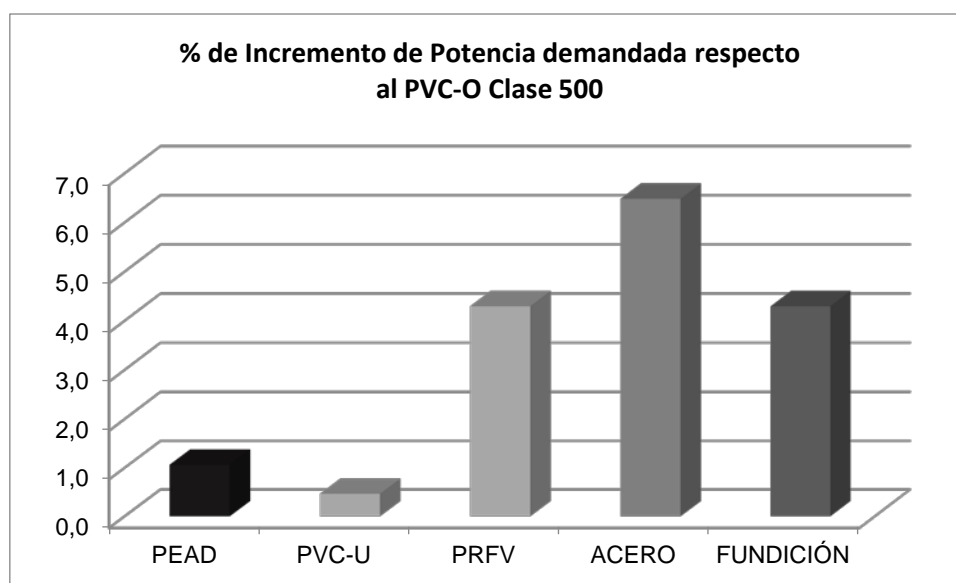
Figura 4. Cálculo potencia teórica

	Material	DN (mm)	Caudal (l/s)	Diferencia de cotas (m)	Pérdida carga total (m)	Altura de bombeo (m.c.a.)	Grav (m/s ²)	Densidad del agua	Potencia demandada en E.B (CV)
1	PVC-O	500	300	100	23,33	123,33	10	1.000	503,4
2	PEAD	560	300	100	27,13	127,13	10	1.000	518,9
3	PVC-U	500	300	100	32,90	132,90	10	1.000	542,4
4	PRFV	500	300	100	33,14	133,14	10	1.000	543,4
5	Acero	500	300	100	40,27	140,27	10	1.000	572,5
6	Fundición	C30	300	100	33,14	133,14	10	1.000	543,4

Tabla 12. Potencia necesaria de bombeo para cada material

Como se puede apreciar en los cálculos adjuntos, en el caso del PEAD (polietileno de alta densidad), se ha tenido que aumentar el diámetro nominal a utilizar para que la velocidad estuviera dentro de los límites definidos, aun así la potencia necesaria a instalar en la estación (Tabla 13 y Figura 5), es mayor que usando PVC-O, por lo que a los sobrecostes energéticos habría que sumar los costes de inversión por la necesidad de instalar un diámetro mayor.

	Material	DN (mm)	Potencia demandada en E.B (CV)	%
1	PVC-O	500	503,41	100%
2	PEAD	560	518,89	103,1
3	PVC-U	500	542,45	107,8
4	PRFV	500	543,41	107,9
5	Acero	500	572,55	113,7
6	Fundición	500	543,41	107,9

Tabla 13. Potencia necesaria E.B para cada material %

Figura 5. Gráfico comparativo de incremento de potencia según materiales

En cualquier caso, si se analizan atentamente los resultados podremos sacar las siguientes conclusiones:

- Si se comparan aquellas tuberías cuyo DN está definido por el diámetro exterior, el PVC-O es la tubería más eficiente desde el punto de vista energético con diferencias muy importantes respecto al PEAD incluso respecto al PVC convencional (PVC-U).
- Si comparamos el PVC-O con aquellas tuberías cuyo DN está definido por el diámetro externo, el PVC-O sigue siendo la tubería más eficiente desde el punto de vista energético con ahorros en término de potencia superiores al 10%.

A las referidas ventajas se habrían de sumar las relativas a su baja celeridad (Tabla 14), ya que los valores de sobrepresión y depresión como consecuencia de transitorios o golpes de ariete causados por variaciones repentinas en el suministro de caudal, son mucho más bajos en el PVC-O que en el resto de materiales, por lo que, podríamos ajustar los costes de inversión de los mecanismos de seguridad a instalar en la impulsión (calderines antiarriete, válvulas anticipadoras de onda, tamaño de las ventosas....).

Material	E (kg/m ²)	e (mm)	a (m/s)
PVC-O Clase 500 (PN16)	4x10 ⁸	13	318
Fundición (K9)	170x10 ⁸	9	1095
Acero	210x10 ⁸	5	1011
PRFV	20x10 ⁸	7	492
PVC-U (PN16)	3x10 ⁸	29,7	424
PEAD (PN16)	1x10 ⁸	45,4	320

Tabla 14. Tabla de celeridades de distintos materiales.

Algunas de las actuaciones (Referencias más importantes acometidas en los últimos años) que se están beneficiando de estas propiedades del **PVC-O Clase 500** son:

- **4ª Fase Modernización de regadíos en la Comunidad de Regantes de Librilla - Murcia España**
 - 12.471 m de DN160, 200, 250, 315 y 400 mm en PN12,5 - DN200, 250 y 400 mm en PN16 bar
 - 500 has
- **CR Calasparra - Modernización de Regadíos de las Aguas Reguladas por el Embalse del Argos de Calasparra – Murcia (España)**
 - 9.660 m en DN400 mm en PN12,5 - DN500 y 630 mm en PN16 bar
 - 1002 has
- **ZR Lorca y Valle del Guadalentín – Murcia (España)**
 - 16.172 m en DN315, 400 mm en PN12,5 – DN 250, 315, 400, 500 y 630 mm en PN16 bar
 - 1000 has
- **Conexión embalse de Oliana – Lleida (España)**
 - 1.918 m en DN250 y 500 mm en PN16 bar
 - 1040 has
- **Modernización de regadíos de la C.R. de Puerto Lumbreras – Murcia (España)**
 - 5.766 m en DN250, 315 y 500 mm en PN16 bar
 - 1071 has
- **T.M. Huercal Overa Sur – Almería (España)**
 - 3.165 m en DN630 mm en PN16 bar
 - 2250 has

- **Modernización del riego de la C.R de la Bassanova, Tomas C-7309 y C-7507 del Aanal de Aragón y Cataluña, TT.MM de Almenar (Lérida) y Alcampell (Huesca)**
 - 35.754 m en DN110 a 630 mm en PN16 bar
 - 1.132 has
- **Renovación de la red de abastecimiento de agua para la CCRR de Moncofa – Castellón (España)**
 - 2.600 m en DN630 mm en PN16 bar
 - 730 has
- **Transformación en Regadío de las finca La Corona y Campo Orús - TM Barboles – Zaragoza (España)**
 - 16.900 m en DN800 mm en PN16 y PN20 bar –DN500 mm en PN16 y PN25 – DN630, 400, 315, 250, 200, 160, y 125 mm en PN16 bar
 - 805 has
- **Obra de compensación de regadío de Peramola Basella – Lléida (España)**
 - 10.978 m DN400, 500 mm en PN12,5 bar - DN400, 500 mm en PN16 bar
 - 1330 has
- **Tubería de impulsión desde desaladora de Palomares a balsa Abellán CCRR Cuevas de la Almanzora – Almería (España)**
 - 17.000 m en DN500 mm en PN16, PN20 y PN25
 - 4.400 has
- **Sector Arroyo-Calamonte de la Zona Regable del Canal de Lobón – Badajoz (España)**
 - 220 m en DN800 mm en PN16 bar
 - 3000 has
- **Transformación en regadío del Sector XII de la Subzona de Payuelos –Área Cea-de la zona regable de Riaño, león**
 - 58.652 m de DN140, 160, 200, 250, 315, 400, 500 y 630 PN16
 - 3070 has

5. Conclusiones

La alta capacidad hidráulica y su baja rugosidad hacen del PVC-O Clase 500 el material ideal para el transporte de agua con el mínimo consumo de energía.

Esta circunstancia unida al actual marco energético, en el que la potencia contratada durante todo el año, lastra a muchas Comunidades de Regantes que hacen uso de ella tan sólo 6 meses a lo largo del mismo, hace que los proyectistas piensen en el PVC-O como una herramienta más de optimización de los costes eléctricos en una obra de modernización o transformación de regadío.

De nada servirían estas referidas cualidades si la durabilidad del material comprometiera las grandes inversiones que se están acometiendo, por lo que, cabe hablar de eficiencia energética en el transporte de agua unida a otras cualidades no menos importantes como la durabilidad del material, su baja celeridad ó por ejemplo su alta resistencia al impacto.

Mientras no cambie este marco energético tan complicado, la viabilidad de estas actuaciones de modernización pasa porque se tengan en cuenta en fase de diseño, cuantas medidas sean posibles para reducir la dependencia de la explotación de la obra del coste eléctrico, balsas de acumulación elevadas, sistemas de telecontrol que permita agrupar los riegos, variadores de frecuencia en las impulsiones, adaptar los equipos de bombeo a distintas posibles demandas y por supuesto, el uso de materiales en la red de riego cuyas propiedades, como es el caso del PVC-O, permitan lograr ese objetivo de optimización energética.

6. Bibliografía

- Normas para Redes de Abastecimiento. (Año 2012) Canal de Isabel II Gestión.
- Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión 3ª edición - ICEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. (Año 2017), CEDEX Sección de Edición, Madrid.
- Manual técnico de conducciones de PVC – ASETUB (Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos). (Año 2007) Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos, AseTUB, Madrid.
- UNE-ISO 16422:2015 - Tubos y uniones de poli (cloruro de vinilo) orientado (PVC-O) para conducción de agua a presión. Especificaciones. (Año 2015). UNE Normalización Española.
- UNE 53331:1997 - Tuberías de poli(cloruro de vinilo) (PVC) no plastificado y polietileno (PE) de alta y media densidad. Criterio para la comprobación de los tubos a utilizar en conducciones con y sin presión sometidos a cargas externas. (Año 1997). UNE Normalización Española.